

기/술/해/설

무전극 황전등의 색온도 조정 및 연색성 평가수 향상

박 기준 · 구 선 근 · 추 장 희
<전력연구원 전력계통연구실 송변전기술그룹>

요 약

마이크로파 방전 무전극 황전등은 마그네트론에서 발생된 마이크로파로 이원자 황을 여기하여 방출되는 빛을 조명에 사용하는 차세대 조명기구이다. 이원자 황에서 방출된 빛은 자외선과 적외선이 매우 적고 가시광선 영역에서 연속적인 분광 분포를 가지며 발광 효율은 100[lm/W] 이상으로 매우 높다. 본 논문에서는 전력연구원에서 국내 최초로 개발한 마이크로파 여기형 무전극 방전등을 소개한다. 방전구의 회전, 방전전력과 압력의 조정, 및 Na 등의 첨가를 통해 전등의 상관색온도를 가변(2,500 - 10,000 K 범위)하였다. 아울러 연색성 평가수를 90 이상으로 개선할 수 있음을 보였다.

Keywords: Electrodeless lamp, Microwave discharge, Sulfur discharge, Efficient lamp

1. 서 론

최근 개발되고 있는 무전극 전등은 전구내부의 전극이나 필라멘트를 제거해 전극의 노화에 의한 전구의 성능저하를 근원적으로 차단함으로써 전구의 수명을 획기적으로 늘리는 물론, 높은 발광효율을 가지

고 있기 때문에 차세대 조명기구로 각광 받고 있다. 1990년대 중반에 미국의 Fusion Lighting Inc.에 의해 최초로 소개된 무전극 황전등은 전극이 없는 작은 전구에서 수만 - 수십만 lumen의 높은 휘도를 발생하며, 일반 백열등에 비해 10배 이상의 긴 수명을 가진다 [1, 2]. 따라서 장기간 고조도의 조명이 필요하거나 사람이 접근하기 어려운 장소에 사용하기에 적당하다.

무전극 황전등은 발광물질로 수은이 아닌 황을 사용하므로 수은에 의한 환경오염을 방지할 수 있는 환경친화적 조명기기이며, 164 lumens/microwave watts의 높은 발광효율을 갖는다 [3, 4]. 무전극 황전등은 75에서 85 사이의 높은 평균 연색성 평가수를 가지므로 색 재현성이 우수하며, 연속적인 분광분포를 가지므로 형광등, 수은등, 메탈할라이드등과 같은 특정 파장이 강조된 전등을 대체하여 자연광에 가까운 조명환경을 구현할 수 있다. 그러나 상관색온도가 약 6,000 K 이상으로 비교적 높은 황전등의 방전광은 차가운 느낌을 주는 푸른색 또는 녹색을 띤 백색광이므로 따뜻한 느낌의 조명이 필요한 장소에도 무전극 황전등을 사용하기 위해서는 방전광의 상관색온도를 낮출 수 있는 기술개발이 필요하다. 또한 백열등을 대신하기 위해서는 현재 80 근처인 연색성 평가수를 좀

더 개선할 필요가 있다. 전력연구원에서는 무전극 황전등의 핵심 기술인 마이크로파 무전극 방전기술을 확립하고 황과 첨가물들의 다양한 분광학적 연구로 연색성 평가수를 개선함은 물론 효율을 유지하면서 상관색온도를 조절할 수 있는 기술을 개발하여 무전극 방전등의 활용범위를 넓힐 수 있는 방안을 제시하였다 [4, 5]. 향후 무전극 황전등의 보급 및 사용의 확대를 위해서는 적절한 조도 유지를 위한 반사경과 높은 휘도의 분배를 위한 light pipe와 같은 주변장치에 관한 적용연구가 뒤따라야 할 것이다.

2. 본 론

2.1 마이크로파 방전 무전극 전등

일반적으로 무전극 전등은 전구 내부에 필라멘트나 전극이 없이, 전구 외부의 여기코일이나 마그네트론 등에서 발생한 전자기파를 전구내에 봉입된 발광물질에 인가하여 방전시키고, 이때 발생하는 빛을 조명에 사용한다. 무전극 전등은 그림 1과 같이 마그네트론과 같은 고주파 발생장치와 이를 위한 전원 및 제어장치, 여기코일 또는 공동과 같은 방전장치 그리고 전구와 전등에서 발생된 전자파의 외부유출을 방지하는 전자파 차폐장치 등 크게 네 부분으로 구성된다.

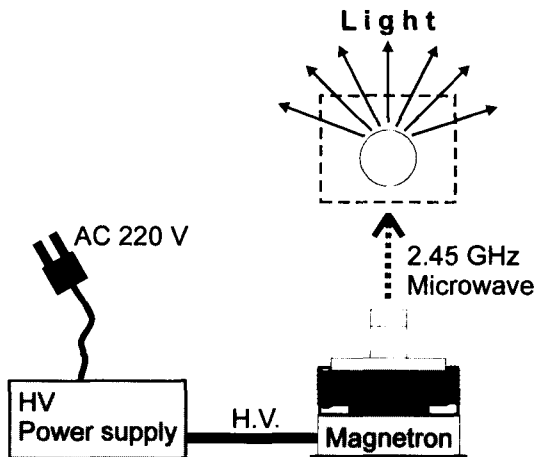


그림 1. 마이크로파 무전극 방전등의 일반적 구성도.

본 연구에서는 높은 방전전력을 얻기 위한 고주파 발생원으로 2.45[GHz]의 상용 마그네트론을 이용하여 충분히 높은 압력의 플라즈마를 얻어 self trapping된 molecular radiation을 일으킬 수 있는 cavity형 방전 시스템을 이용하였다[5]. 지름 약 4[cm]인 석영으로 제작된 전구에 수 torr 압력의 Ar과 같은 불활성 가스와 함께 황을 충전하고 이를 약 1[kW] 출력을 갖는 마그네트론을 이용하여 도파관에 연결된 cavity에서 방전하는 형식을 기본으로 하였다.

2.2 실험 장치

실험에 사용된 전구는 지름이 약 4[cm]인 석영(Quartz)으로 만들어진 구형이다. 깨끗이 세척된 전구 내부에 순도 99.99%의 황 또는 황과 첨가물을 일정량 투입하고 buffer gas로서 99.9999 %의 Ar을 수 torr 정도 채운 후 밀봉하였다. 제작된 전구는 그림 2의 WR340 도파관 연결형 방전장치의 공동 중심부에 장착하였다. 방전공동(discharge cavity)으로 금속망으로 제작된 원통형 공동이 이용되었으며, 입력되는 마이크로파 에너지를 전구에 집중시켜주는 역할을 한다.

고주파 발생장치로 2.45[GHz]대의 마이크로파를 발생시키는 전자레인지용 마그네트론을 사용하였으며 이를 위한 전원장치를 제작하였다. 방전시스템의 마그네트론에서 발생한 2.45[GHz] 마이크로파는 WR340 규격의 도파관에 마그네트론용 launcher를 통해 인가된다. 인가된 마이크로파는 isolator와 directional coupler를 통과하여 황동망으로 이루어진 공동내부로 입력된다. 이때 moving short circuit을 이용해 도파관-공동 사이의 임피던스를 정합하며 입력된 마이크로파 전력은 directional coupler의 진행과 측정용 단자를 통해 전력계에서 측정한다. 공동에 인가된 마이크로파 전력의 대부분은 공동 내부에 장착된 방전구내 물질을 방전시키는데 사용되고 일부는 반사되어 directional coupler를 거쳐 isolator에서 흡수되어 제거된다. 반사된 마이크로파 전력은 directional coupler의 반사파 측정용 단자를 통해 전

력계에서 측정하며 방전구에 흡수된 마이크로파 전력은 측정된 입사전력과 반사전력의 차이이다. 장착된 방전구는 전구표면 특정 부분의 온도 상승을 줄이고 황을 균일하게 방전시키기 위해 일정한 속도로 회전할 수 있는 구조를 갖추었다. 공동에 장착된 방전구의 회전축은 중력방향에 수직이며 실험장치가 설치된 광학 테이블면과 수평이다. 준비된 전구들에서 방출되는 자외선에서 근적외선 사이의 방전광 분광분포는 Vacuum Fourier-transform spectrometer (IFS66v/S, Bruker)로 측정하였으며, 휘도, 방사휘도, 상관색온도 및 평균 연색성 평가수 등은 colorimeter (PR-650, Photo Research)와 교정된 감쇄기를 이용하여 2° 시야에서 측정하였다.

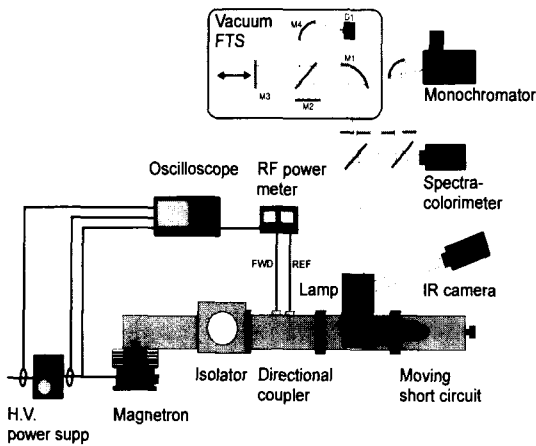


그림 2. 전체 실험 장치 설치.

2.3 무전극 황 방전광의 분광분포

마이크로파로 여기된 무전극 황전등의 마이크로파 입력전력에 대한 분광광도 변화를 그림 3과 같이 측정하였다. 마이크로파 입력전력이 0.7[kW] 보다 작을 때 방전광은 파장 450[nm] 근처에 최대 값을 갖는 푸른색을 띠는 백색이며, 입력전력이 1.0[kW]가 넘을 때는 방전광의 중심파장(최대값)이 긴파장쪽으로 이동하여 480[nm] 근처가 되고 푸른색이 약해진다. 그림 4의 이원자 황의 에너지준위에서 황증기(S₂)의 B3Σ_u⁻ 상태와 X3Σ_g⁻ 상태 사이의 에너지

차이가 자외선 영역에 가깝기 때문에 황 방전광의 발광 스펙트럼은 자외선 영역에서 발광중심을 가진다. 그러나 입력전력을 높여 황 증기가 적절한 밀도를 가지게 되고 황에 의해서 방출된 빛이 다른 황 분자를 여기하게 되면 여기된 분자는 최초 발생된 빛보다 파장이 같거나 더 긴 빛을 방출하게 된다. 이 과정을 여러 차례 되풀이하면 발광효율은 떨어지나 그림 3과 같이 스펙트럼의 중심이 적색쪽으로 이동하게 되는 것으로 생각된다. 또한 황 증기의 온도와 밀도가 적절히 유지되면 대부분의 황은 이원자 상태로 있을 확률이 커지므로 선속을 가진 황 원자 스펙트럼은 억제되고 수많은 분자 선속이 중첩된 부드러운 모양의 황 분자 스펙트럼이 나오게 된다. 위와 같이 황은 특정한 방전조건에서 태양광과 비슷한 연속적인 분광분포를 갖는 빛을 방출한다.

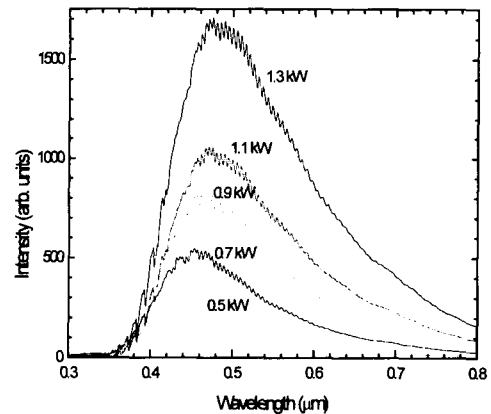


그림 3. 무전극 황전등의 마이크로파 입력전력을 0.5 - 1.3(kW)로 변화했을 때 방전광의 분광분포.

그림 5는 입력전력과 황 투입량 변화에 대한 방전광 분광분포의 최고점의 변화를 나타낸 그림이다. 입력전력이 높을수록, 들어있는 황의 양이 증가할수록 최대 peak 파장은 장파장쪽에 존재한다. 이로부터 황 방전광 분광분포가 장파장으로 이동하는 이유가 자체역전효과 때문이라는 사실을 유추할 수 있다 [6].

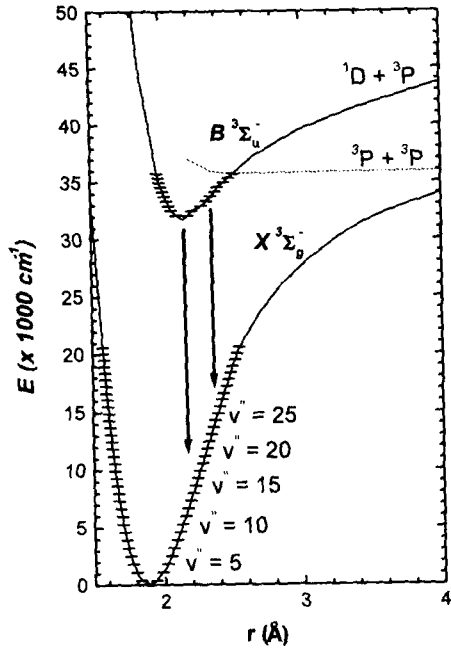


그림 4. Energy diagram for S2

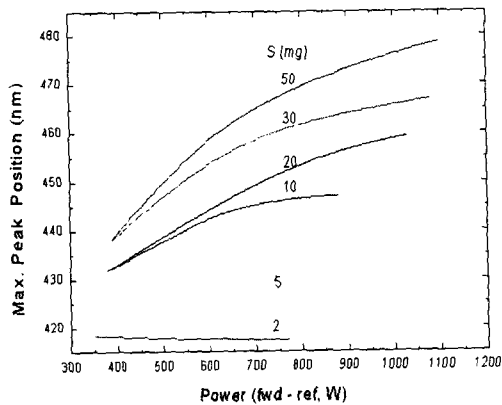


그림 5. 입력전력과 황 투입량 변화에 대한 방전광 분광분포의 최고점 파장.

그림 6은 자외선 영역(45,000-25,000[cm]⁻¹; 220-400[nm])에서의 황 방전구의 점등후 시간진행에 대한 방전광 분광분포의 변화를 나타낸 것이다. 방전이 시작된 직후 고체 황이 액화 및 기화되는 동안 강한

무전극 황전등의 색온도 조정 및 연색성 평가수 향상 자외선을 방출한다. 그러나 방전이 정상상태에 도달하면 자외선 영역의 방전광이 자체역전효과에 의해 모두 황에 흡수되어 전구의부로 방출되지 않음을 알 수 있다. 따라서 저압(Low pressure)에서 황을 방전시킬 때 방전광이 자외선 영역에서 강하게 방출되나 고압(High pressure)에서 황의 방전광은 자체역전효과에 의해 자외선 영역의 방전광을 방출하지 않음을 알 수 있다.

황전등이 최고 밝기의 20% 이상의 휘도를 갖거나 정상동작 할 때 전체 방전광에 대해 파장이 380[nm] 이하인 자외선이 차지하는 비율은 0.7 % 미만이며 대부분의 방전광은 가시광선 및 적외선 영역에서 방출된다. 또한 흡수전력에 관계없이 방전광의 전체 파장영역에 대한 가시광선 비율이 거의 일정한 값을 가진다. 따라서 흡수전력이 증가함에 따라 방전광 중 가시광선과 적외선 영역이 비슷한 비율로 증가한다.

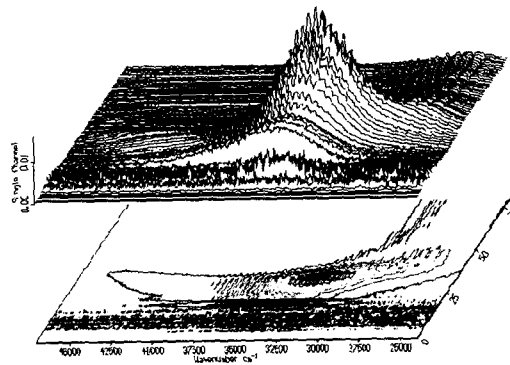


그림 6. 자외선 영역에서의 방전광 분광광도의 시간진행에 따른 변화.

2.5 방전구의 회전에 의한 방전광의 색도조정

방전하는 전구를 회전시키면 그림 7에서와 같이 방전광 분광분포의 시작점과 최고점이 약 50 nm 장파장쪽으로 이동한다. 이는 방전구를 회전시키면 회전하지 않을 때와 비교하여 방전광의 자외선 영역이 감소하고 그 결과로 전체 분광분포가 장파장 쪽으로 이동하여 상관색온도가 낮아짐을 의미한다. 방전구가

회전하지 않을 때는 방전하지 않는 황 기체의 대부분은 방전구의 바닥에 깔려있게 된다. 따라서 방전광 중 상당부분은 방전하지 않는 기체 황을 통과하지 않고 방전구 외부로 방출되어 자체흡수에 의한 효과가 작게 일어난다. 그러나 방전구를 회전하면 원심력에 의해 바닥에 깔려있던 방전하지 않는 황이 방전구의 표면으로 퍼지게 되어 방전구의 내벽을 둘러싸게 된다. 따라서 방전광 중 단파장의 빛은 자체역전 효과에 의해 황분자에 의해서 흡수되어 회전하지 않을 때와 비교해 전체 방전광의 분광분포가 장파장 영역으로 이동하게 되므로 상관색온도가 낮아진다. 그러나 상당히 높은 입력전력에서 방전시킬 때는 회전효과에 의한 색도조절효과가 줄어드는 것을 확인하였다. 이것은 입력전력이 아주 높은 경우 전구의 온도가 높아서 구내에 있는 황이 거의 S2로 존재하고 열적 운동으로 방전구에 균일하게 분포하는 대부분의 이원자 황이 방전에 참여하기 때문에 전구의 내벽근처에 머무르는 차가운 S2 분자가 적으므로 회전의 효과가 크게 나타나지 않는 것으로 생각된다.

방전구를 회전시킬 경우 광원의 상관 색온도를 낮출 뿐만 아니라 방전 플라즈마를 방전구 내에 끌고 루 퍼지게 하여 플라즈마의 상태를 안정화시키는 부가적인 장점이 있다. 특히 전구의 회전속도가 높아지면 가시광선 영역의 방전광의 세기는 약간 줄고 적외선영역의 세기는 증가하는데 이는 방전구의 회전에 의해 방전구내 황이 잘 섞여 안정적으로 방전하고 전구의 온도가 높아지므로 적외선 영역의 열선 방사 (thermal radiation)가 증가하기 때문이다

방전구를 회전할 경우 방전광의 자외선쪽은 줄어들고 가시광선 영역이 더 강해지는 것을 확인하였다. 황 방전등이 여러 가지 용도의 조명용 광원으로 적당하도록 단파장 영역의 광도를 감소시키려면 방전구를 회전하는 방법을 이용할 수 있다. 아울러 방전구의 회전으로 전등의 연색지수와 색도를 조절할 수 있음을 확인하였다.

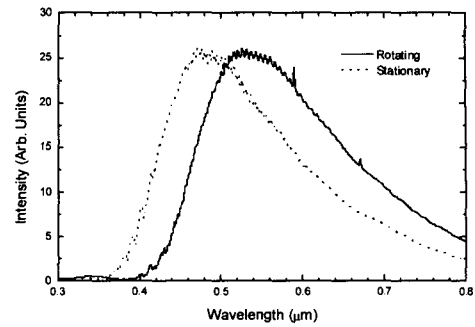


그림 7. 방전구를 회전했을 때의 분광광도.

2.6 Na계열 물질 첨가에 의한 효과

Na를 첨가한 방전구와 황 방전광의 분광광도를 그림 8에 보였다. Na를 황 방전구에 첨가 할 경우 전체 방전광에서 가시광선이 차지하는 비율은 Na의 양이 클수록, 흡수전력이 증가할수록 감소하고 상대적으로 적외선 영역에서 방출되는 방전광의 비율이 커져 방전구의 온도가 높아짐을 알 수 있다. 또한 흡수전력이 높을수록, 첨가된 Na의 양이 많을수록 500 nm 에 최고점을 가진 황 방전광에 비해 589 nm의 Na 방전광의 세기가 증가하기 때문에 가시광선 영역의 방전광 중 황 방전광의 비율이 작아지며 그 결과 상관 색온도가 낮아진다. 또한 첨가된 Na는 입력전력이 0.5 kW 이하에서도 황의 안정적 방전을 유도하므로 기존 무전극 황전등이 1 kW 이하에서 방전시키기 힘든 단점을 극복하였다[6, 7].

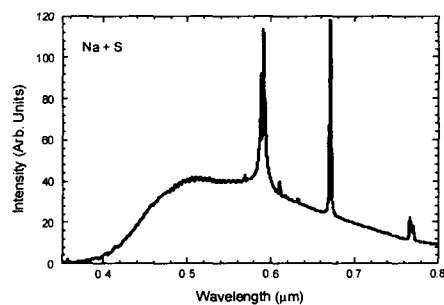


그림 8. Na를 첨가한 황전구 방전광의 분광광도.

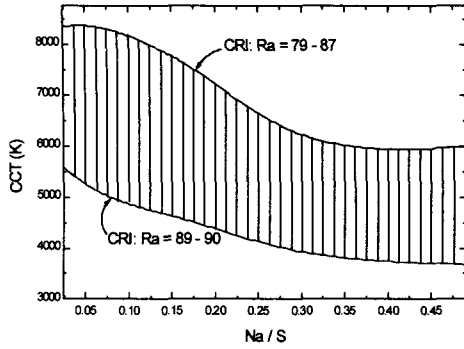


그림 9. 제작된 전등의 투입된 Na-황 비율에 대한 상관색온도 조절범위 및 연색성 평가수.

황 방전구에 Na를 첨가함으로써 무전극 황전등의 상관색온도를 조절할 수 있었다. 기존 무전극 황전등의 상관색온도가 5,600 K 이상인데 반해, Na가 첨가된 방전구의 상관색온도는 실제 생활에 쓰기 적당한 8,500 K에서 3,500 K 사이에서 가변 할 수 있었다. 그림 9는 Na와 황의 비율에 대한 연색지수 및 상관색온도의 변화가능 범위이다. 특히 첨가된 Na의 양에 따라 방전구내 마이크로파 흡수전력을 조정함으로써 한 개의 전구로 2,800 K 이상의 상관색온도가 변폭을 가질 수 있다. 또한 Na의 첨가가 사람이 민감하게 느끼는 555[nm] 근처를 강조함으로써 기존의 무전극 황전등의 광도를 유지함은 물론 연색지수를 향상시킬 수 있었다[7, 8].

2.7 무전극 황전등의 평균 연색성 평가수

황 방전구와 황 + Na 방전구의 회전속도에 따른 연색지수의 변화를 측정하여 첨가한 Na가 황 방전구의 연색지수에 미치는 영향을 알아보았다. 황 방전구는 그림 10과 같이 전체 동작영역에서 87에서 79 사이의 높은 연색지수를 유지한다. 방전구의 회전속도가 0.8[Hz]와 3[Hz]에서의 연색지수는 86에서 87 사이를 유지하며 방전구의 회전속도가 6[Hz] 이상이면 회전속도가 높을수록, 흡수전력이 작을수록 연색지수가 낮아지는 경향을 보인다.

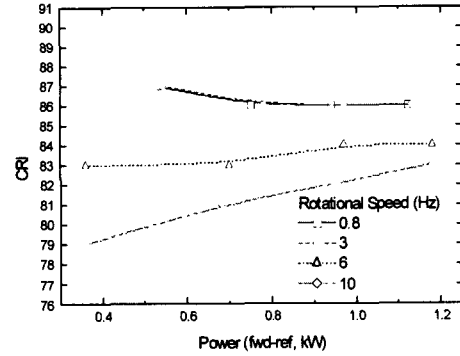


그림 10. 황 방전등의 입력전력 및 회전 속도 변화에 대한 연색지수 변화.

황 + Na 방전구의 연색지수는 그림 11에서와 같이 79에서 90의 범위내에 있으므로 Na의 첨가가 황 방전구의 연색지수를 감소시키지 않고 오히려 증가 시킴을 알 수 있다. 흡수전력이 0.7[kW] 이하일 때는 흡수전력이 증가할수록, 방전구의 회전속도가 높을수록 연색지수가 증가하며 같은 흡수전력에 대해 방전구의 회전속도가 빠를수록 연색지수가 증가한다. 흡수전력이 0.7[kW] 이상일 때 연색지수는 89에서 90 사이로 수렴되어 방전구의 회전속도에 관계없이 일정한 값을 가진다.

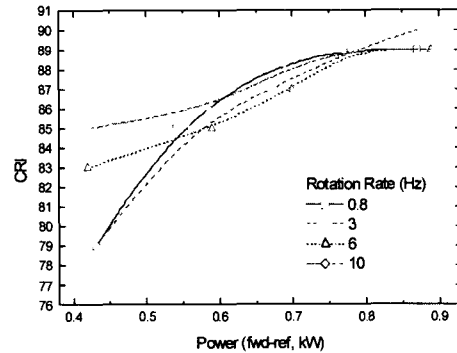


그림 11. Na 첨가 황 방전등의 입력전력 및 회전 속도 변화에 대한 연색지수 변화.

3. 결 론

본 논문에서는 전력연구원에서 개발한 마이크로파 여기형 무전극 방전등에 관하여 소개하였다. 개발된 무전극 황전등의 상관색 온도를 조정하기 위하여 전구를 회전하는 방법과 방전구에 Na 계열 할라이드를 첨가하는 방법을 연구하였다. 방전광의 상관색온도를 2,500 - 10,000 K 범위에서 조절할 수 있음을 보였다.

황전등의 연색성평가수를 전구의 회전효과와 Na 계열 할라이드 첨가 및 입력전력 조정으로 향상시킬 수 있었다. 황만 방전했을 경우 마이크로파 전력에 따라 방전광의 평균 연색성평가수는 70 - 80 이었으며, 동일한 방전구를 일정한 속도로 회전하였을 때 연색성평가수는 마이크로파 전력에 따라 80 - 85 로 높아졌다. 그리고 Na를 첨가한 방전구는 Na의 첨가량에 따라 연색성평가수가 80 - 90으로 매우 높게 측정되었다. 적절한 조건에서 무전극 방전등은 90 이상의 높은 연색성평가수를 가지며 기존 무전극 황전등의 장점을 유지할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] F. M. Rubinstein, S. M. Berman, R. D. Clear, D. Crawford, W. Ferguson, C. Greene, C. Gabor, O. C. Morse, T. Orr, M. Packer, C. Praul, M. J. Siminovitch, G. J. Ward and C. Zhang, "Lighting Systems," Energy & Environment Division LBL, Building Technologies Program 1994 Annual Report, LBL-36553, p. 18, 1994.
- [2] B. P. Turner, M. G. Ury, Y. Leng and W.G. Love, "Sulfur

Lamp - Process in Their Development," IES Annual Conference, 1995.

- [3] "Fusion Lighting Solar 1000," Lighting Research Center, Lighting Futures, Vol. 2, No.1, p. 2, 1996.
- [4] B. P. Turner, M. G. Ury, Y. Leng, and W. G. Love, "Sulfur Lamps-Progress in Their Development," Journal of I.E.S., Winter, pp. 10-16, 1997.
- [5] 김진중, 박기준, 구선근, "무전극 황전등 연구개발 - 2차년도 중간보고서," TM.95YS27.M1998.76, 한국전력공사 전력연구원, 1998.
- [6] 박기준, 구선근, 추장희, 이영우, "무전극 황전등 연구개발 - 최종 보고서," TR.95YS27.S1999.341, 한국전력공사 전력연구원, 1999.
- [7] 구선근, 박기준, 추장희, "전구내 NaI 첨가에 의한 무전극 황전등의 특성 변화," 전기학회논문지 48C권, 1999. 11.
- [8] 구선근, 박기준, 추장희, 한국전력공사 전력연구원, 특허출원중.

◆ 著 者 紹 介 ◆

박 기 준 (朴基濬)

1997년 University of Central Florida 대학원 전기전자공학과 졸업 (광과학-전기공학 박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원. 주요관심분야: 초고주파 공학, 안테나 설계-해석, 부분방전 검출 기술, 원격외선 레이저.

구 선 근 (具禪根)

1994년 연세대 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임보연구원.

추 장 희 (秋長姬)

1992년 연세대학교 대학원 물리학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.